



용기누출로 인한 가스 폭발사고에서 API-581 절차의 누출 시나리오에 의한 사고결과 분석

이헌창* · 조지훈** · †김태옥

명지대학교 화학공학과, *한국안전이엔씨, **한국산업안전공단
(2007년 5월 7일 접수, 2007년 5월 25일 채택)

Consequence Analysis Using Release Scenario of API-581 BRD for Gas Explosion by Vessel Release

Hern-Chang Lee* · Ji-Hoon Cho** · †Tae-Ok Kim

Dept. of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

*Korea Safety Engineering and Consulting

**Korea Occupation Safety Healthy and Agency

(Received 7 May 2007, Accepted 25 May 2007)

요 약

용기누출로 인한 가스 폭발사고의 영향을 분석하기 위해 API-581 절차에서 제시된 누출 시나리오를 사용하여 누출물질, 온도, 압력 및 용기의 종류 등을 변화시키면서 누출속도, 장치피해영역 및 상해영역을 산출하였다. 그 결과, 용기누출에서 누출속도, 장치피해영역 및 상해영역은 배관누출에서보다 상당히 큰 값을 가지며, 그 크기는 탱크 > 반응기 > 드럼 > 탑의 순서로 나타났다.

Abstract – For consequence analysis at a gas explosion by vessel release, release rates, damage areas of facilities, and fatality areas were estimated and analyzed at various conditions (release materials, temperatures, pressures, and vessel types) by using the release scenario of API-581 BRD. Simulation results showed that release rates and consequences in the vessel release were higher than those in the pipe release, and the order of release rates and damage areas was as follows; tank > reactor > drum > column.

Key words : Consequence analysis, Gas explosion, Vessel release, Release scenario, API-581

I. 서 론

석유화학, 정유, 가스 등의 산업은 기술이 급격하게 발전함에 따라 복잡·다양화되고 있으며, 더욱이 생산효율을 증가시키기 위해 압력설비와 같은 고온·고압의 조건 하에서 운전하는 설비들이 급증하고 있다. 또한 설비들은 설치 후 시간이 지남에 따라 점차적으로 낡아지기 때문에 대형사고의 발생 가능성은 그 어느 때보다 높아지고 있다[1,2]. 따라서 대형 사고발생을 최소화하고, 사고를 사전에 방지하기 위한 노력이 절실히 요구되기 때문에 사고영향을 평가하기 위한 방법이 최근 많이 연구되고 있다. 그러나 사고결과 분석에서 누출 시나리오 선정에 대한 명확하고, 객관적인

기준이 없기 때문에 K-CARM 프로그램과 같은 정량적 위험성 평가 프로그램에서는 누출공(release hole)의 크기를 최악의 누출 시나리오, 즉 파열로 가정하거나 사용자가 임의로 입력하기 때문에 실제 사고결과와는 상당한 차이가 있을 수 있다. 이와 같이 피해예측 결과에 대한 신뢰성 문제로 안전대책수립에 어려움을 겪고 있기 때문에 보다 객관적이고, 현실성 있는 누출 시나리오에 의해 정확한 사고피해를 예측할 필요가 있다.

이 연구에서는 객관적이고, 현실성 있는 누출 시나리오를 사용하여 용기누출로 인한 가스 폭발사고의 영향을 분석하는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 가연성 가스가 다양한 누출조건(용기, 온도, 압력, 누출물질 등)에서 누출되어 폭발사고가 발생하는 경우에 API-581 절차[3]에서 제시된 누출 시나리오를 사용하여 일

†주저자:kimto@mju.ac.kr

반적인 사고결과 분석(consequence analysis, CA) 방법[4]에 의해 누출속도(또는 누출량)와 사고 피해범위를 산출하여 비교·분석하였다.

II. 이 론

일반적인 사고결과 분석절차는 Fig. 1과 같이 누출유형 및 누출상태에 따라 누출속도 또는 누출량을 산출하고, 화재 및 폭발에 의한 피해범위와 독성물질 확산에 의한 독성영향을 산출한다[3].

이 연구에서는 가연성 가스가 용기에서 누출되어 증기운 폭발사고가 발생하는 경우 누출원모델로부터 순간 또는 연속 누출량을 산출하고, 증기운 폭발모델로부터 사고결과인 과압(overpressure)을 사용하여 장치피해 영역과 상해영역을 산출하였다.

2.1. 누출원모델

용기에서 기체가 누출공을 통해 연속적으로 누출되는 경우 누출기체의 유속은 식 (1)에서 압력이 P_{trans} 보다 큰 경우에는 음속으로, 적거나 같은 경우에는 아음속으로 구분한다[4,5].

$$P_{trans} = P_S \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

여기서 P_{trans} 와 P_S 는 각각 전이압력(psi)과 저장압력(psi)이고, γ 는 열용량비(CP/CV)이다.

Crowl과 Louvar[6]는 용기누출에서 초기누출속도(kg/s), Q 를 음속누출인 경우에는 식 (2)를 아음속누출인 경우에는 식 (3)을 각각 제시하였다.

$$Q = C_D A P_S \sqrt{\frac{\gamma g_c M w}{R T_S} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (2)$$

$$Q = C_D A P_S \sqrt{\frac{2 g_c M w}{R T_S} \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left[\left(\frac{P_a}{P_S} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_S} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma}} \right]} \quad (3)$$

여기서 A 는 누출공의 단면적(m^2), R 은 기체상수($kJ/kmol \cdot K$), g_c 는 전환인자($kg \cdot m/N \cdot s^2$), Mw 는 분자량(-), T_S 는 공정온도(K), P_a 는 대기압(psi), 그리고 C_D 는 누출계수(-)로, 여러 형태의 누출기구에서 난류흐름인 경우의 C_D 값은 Green과 Perry[7]에 제시되었다.

2.2. 증기운 폭발모델

가연성 가스가 누출되면 점화원에 의해 증기운 폭발과 같은 사고가 발생하는데, 증기운 폭발에 의한 피해를 예측하기 위해 일반적으로 사용되는 모델인 TNT 당량모델은 상대 연소열에 근거한 TNT의 상당량을 산출하여 사고피해를 산출하는 방법으로[8], TNT 상당량, $W(kg)$ 를 산출하는 식은 식 (4)와 같다.

$$W = \frac{\eta M H c}{H c_{TNT}} \quad (4)$$

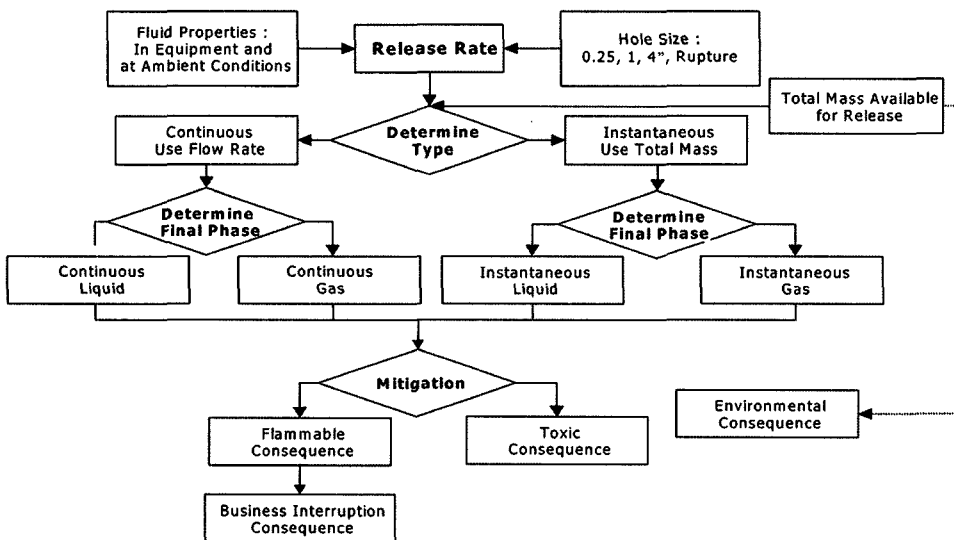


Fig. 1. Procedure for consequence analysis.

여기서 M 은 누출된 가연성 물질의 질량(kg), H_c 는 가연성 물질의 연소열(kJ/kg), 그리고 η 는 폭발계수로, 석유화학물질의 경우에 약 0.01~0.2이다. 또한 TNT의 연소열, H_{cTNT} 는 4680 kJ/kg(2000 Btu/lb_m)이다[9].

따라서 식 (4)에 의해 산출한 TNT 상당량을 사용하여 환산거리, $Z(m)$ 를 산출하고, 환산거리와 TNT 상당량으로부터 관심거리, X 에서 과압(kPa)을 산출할 수 있으며[4,6], 이로부터 폭발사고에 의한 인명이나 구조물에 대한 피해영향을 추정할 수 있다.

$$X = Z \times W^{1/3} \quad (5)$$

2.3. 매개변수 산출

일반적인 사고결과 분석방법에서는 누출속도를 산출하기 위해 누출공의 크기를 다양하게 선택하고 있으나 적절한 누출공의 크기를 선정하는 것은 현실적으로 매우 어려울 뿐만 아니라 누출공의 크기에 대한 선정기준이나 방법은 현재까지 제시된 바 없다. 그러나 미국 석유협회(API)에서 제시한 위험기반검사(risk based inspection, RBI) 절차, 즉 API-581 절차[3]에서는 누출공의 크기를 소형, 중형, 대형, 그리고 파열(rupture)로 분류하고, 구멍의 크기범위는 사업장 내·외의 잠재적인 피해영향에 따라 선택한다.

따라서 이 연구에서는 배관누출에서 누출 시나리오 선정 및 사고결과 분석연구[10]에서와 같이 누출공의 크기를 API-581 절차에서 제시된 4가지 표준 구멍크기, 즉 누출공 직경이 배관직경보다 작거나 같으면 1/4, 1, 4 in 및 파열을 사용하였다. 그리고 누출유형은 순간누출 또는 연속누출 중 하나를 선택하였으며, 특히 3분 이내에 10,000 lb_m 이상이 누출되는 경우에는 순간누출로 가정하고, 직경이 1/4 in 이하의 누출공에서 누출은 연속누출로 가정하였다[3].

누출 후 유체의 확산특성은 주위의 상(phase)에 따라 크게 다르며, 운전조건에서 대기조건으로 상태가 변화할 때 상변화가 없으면 유체의 최종상태는 초기상태와 동일하다. 그러나 상변화가 있으면 피해크기를 산출하

는데 필요한 물질상태의 평가가 어려워진다.

이 연구에서는 C1-C2 및 C2-C3의 대표물질로 LNG($M_w=16$, $H_c=50020$ kJ/kg)와 LPG($M_w=44$, $H_c=46010$ kJ/kg)을 사용하였는데, 누출상태는 전 범위에 서 가스이었다.

2.4. 피해면적 산출

폭발사고에 의한 피해면적은 누출속도와 누출(지속)시간으로부터 총 누출량(M)을 산출하고, 일정한 피해크기, 즉 일정한 과압을 갖는 환산거리로부터 누출지점에서부터 과압이 형성되는 거리를 산출하여 피해거리(반경)로부터 피해면적을 산출하였다. 이때, 폭발계수는 1로, 그리고 피해지역은 원으로 가정하였다.

따라서 산출한 장치피해영역과 상해영역으로부터 Table 1의 누출 시나리오별 고장률을 사용하여 식 (6)에 의해 가중평균 피해영역을 산출하였다[3].

Weighted average area =

$$\frac{\sum_{n=1}^{n=4} (Area)_n \times (Frequency)_n}{\sum_{n=1}^{n=4} (Frequency)_n} \quad (6)$$

III. 결과 및 고찰

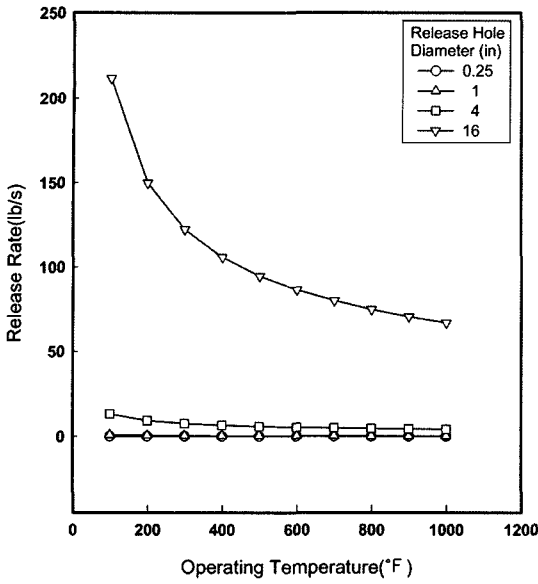
일반적인 사고 결과분석에서는 용기누출은 하나로 통일하여 해석하지만, API-581 절차에서는 용기의 종류를 칼럼, 반응기, 탱크, 압력용기(드럼)와 같이 다양하게 분류하는데, 그것은 용기의 종류에 따라 식 (6)에 사용되는 고장발생 빈도가 다르기 때문이다. 따라서 용기의 종류에 따른 누출속도와 피해영역을 산출하고, 이를 분석하였다.

3.1. 누출속도

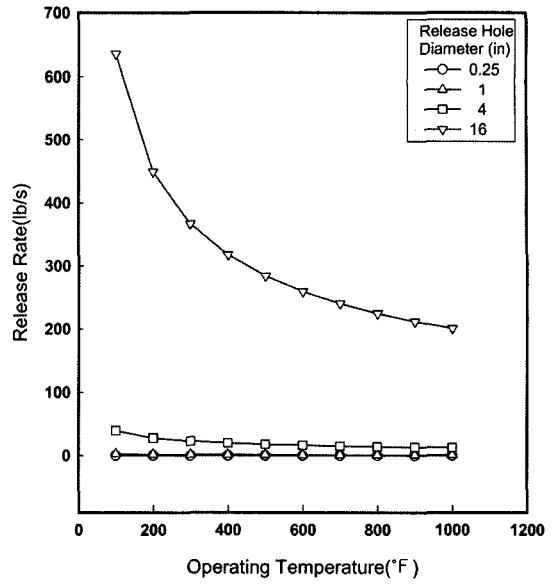
다양한 누출조건에서 산출한 LNG의 누출속도는

Table 1. Suggested generic equipment failure frequencies.

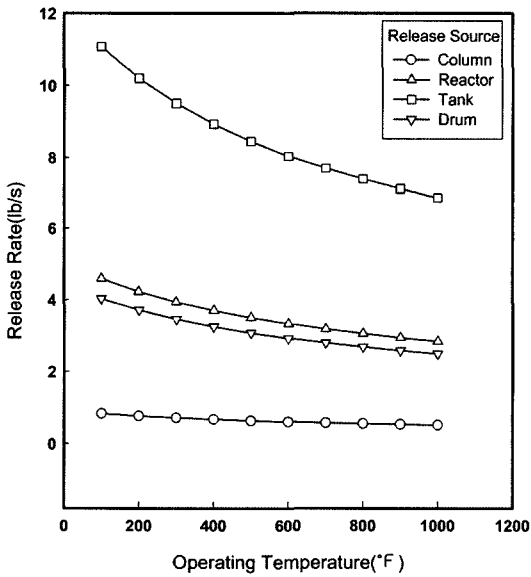
Equipment type	Leak frequency (per year for 4 hole sizes)			
	1/4 in	1 in	4 in	Rupture
Pressure vessels (drum)	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	6×10^{-6}
Column	8×10^{-5}	2×10^{-4}	2×10^{-5}	6×10^{-6}
Reactor	1×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-5}	2×10^{-5}
Atmospheric storage tank	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	2×10^{-5}



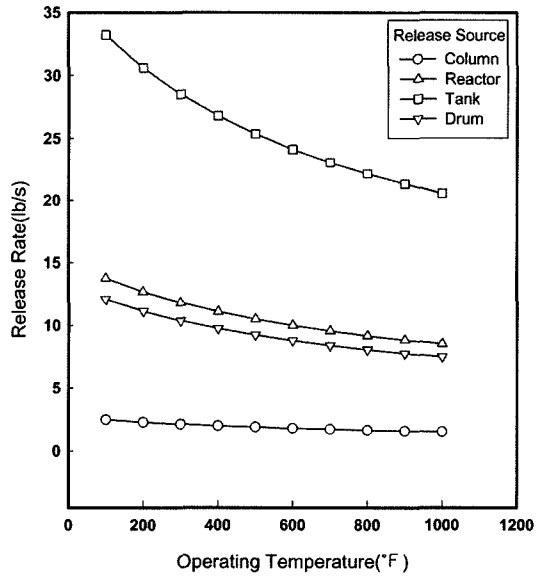
(a) Hole diameter (1 atm)



(b) Hole diameter (5 atm)



(c) Release source (1 atm)



(d) Release source (5 atm)

Fig. 2. Effect of the operating temperature, the release hole diameter, and the release source on the release rate at different operating pressures for LNG.

Fig. 2와 같다. Fig. 2의 (a)와 (b)에서와 같이 용기누출에서 누출속도는 공정온도가 증가할수록, 그리고 누출공이 작을수록 감소하며, 또한 압력이 1기압에서 5기압으로 증가하면 누출속도는 약 3배로 증가하였다. 그리고 누출공의 크기가 작은 경우에는 누출속도가 작아서

온도의 변화에 민감하지 않으나, 누출공이 16 inch인 경우에는 온도 증가에 따라 누출속도가 급격하게 감소하였다. 이와 같은 변화경향은 배관누출에서 얻은 결과와 같다[10]. 그러나 Fig. 2의 (c)와 (d)의 가중평균에 의한 누출속도는 탱크>반응기>드럼>탑의 순이었는데,

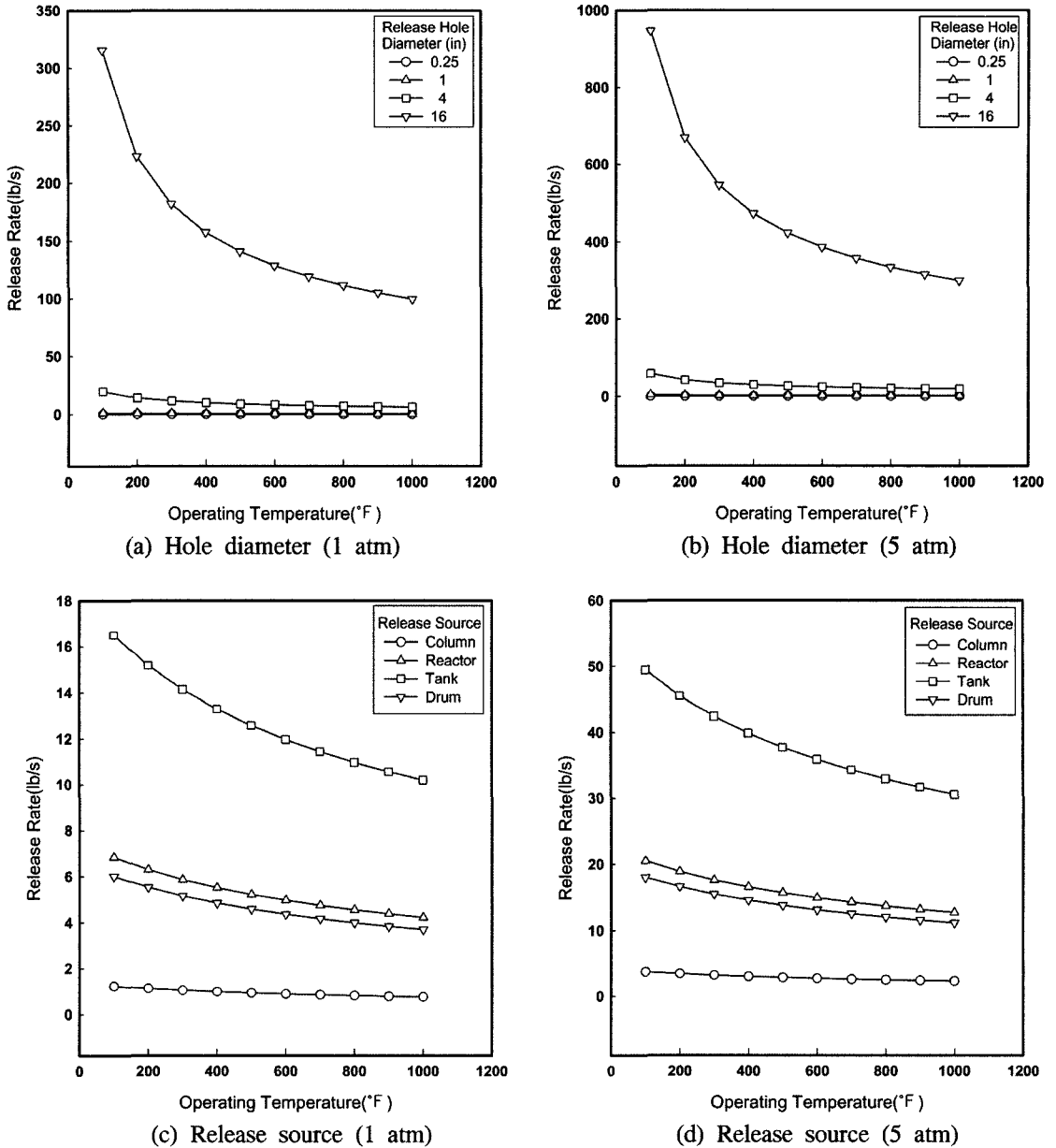


Fig. 3. Effect of the operating temperature, the release hole diameter, and the release source on the release rate at different operating pressures for LPG.

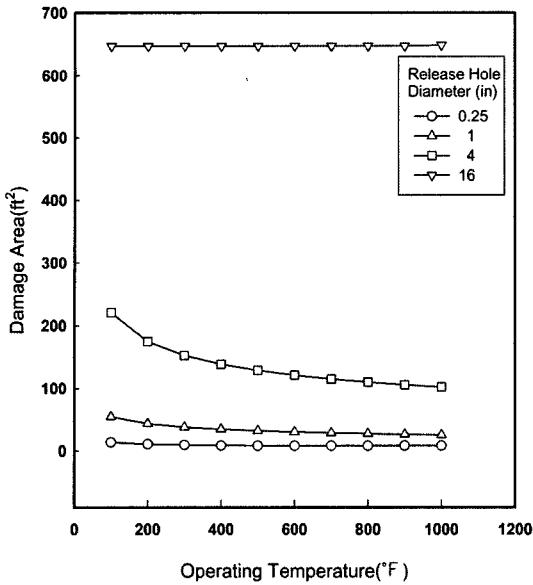
이것은 용기의 종류에 따라 고장발생빈도가 다르기 때문이다.

누출물질이 LPG인 경우에 산출한 누출속도는 Fig. 3과 같이 변화경향은 Fig. 2의 LNG에서와 거의 유사한 경향을 나타내었으며, LNG의 경우보다 누출공의 크기가 작은 경우에는 크게 증가하지 않았으나 최대

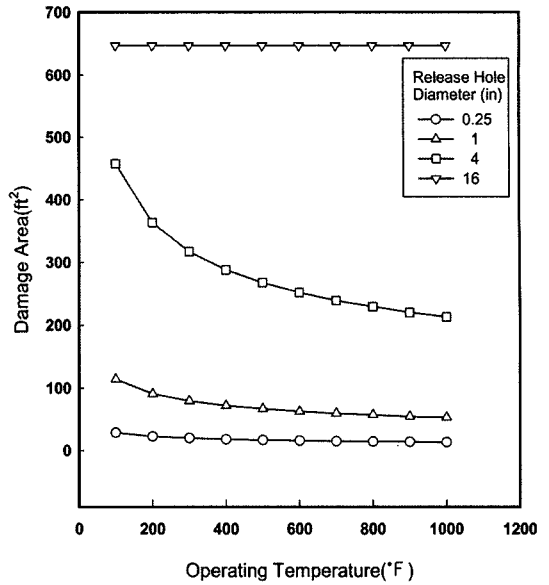
누출공인 16 inch에서는 약 1.5배가 큰 값을 나타내었다.

3.2. 장치피해영역

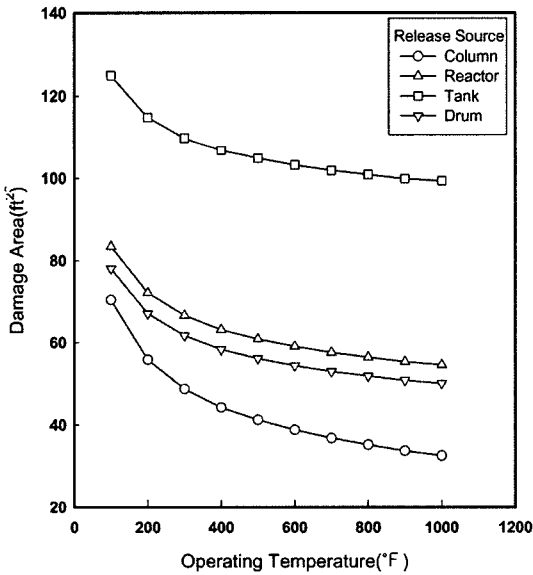
가연성 가스의 폭발에 의한 설비의 손상기준[3]은 폭발과압이 5 psig인 경우로 설정하고 장치피해영역을



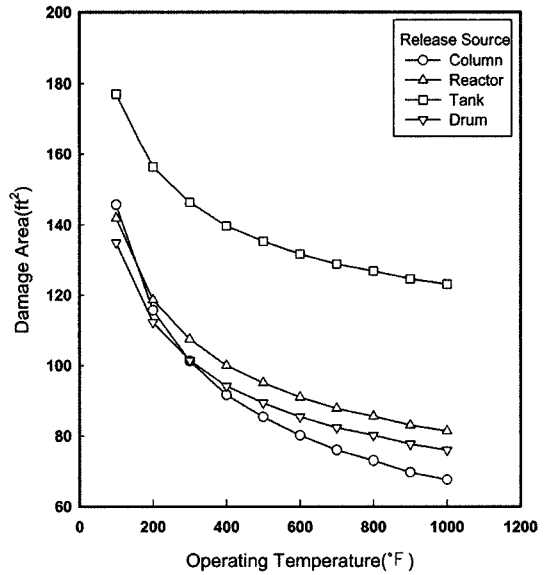
(a) Hole diameter (1 atm)



(b) Hole diameter (5 atm)



(c) Release source (1 atm)

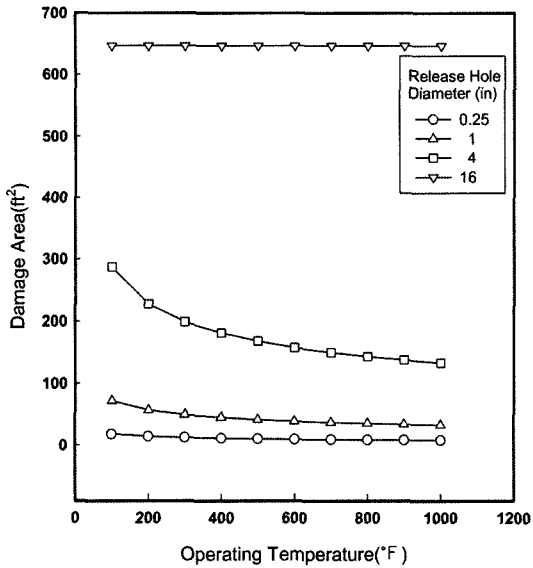


(d) Release source (5 atm)

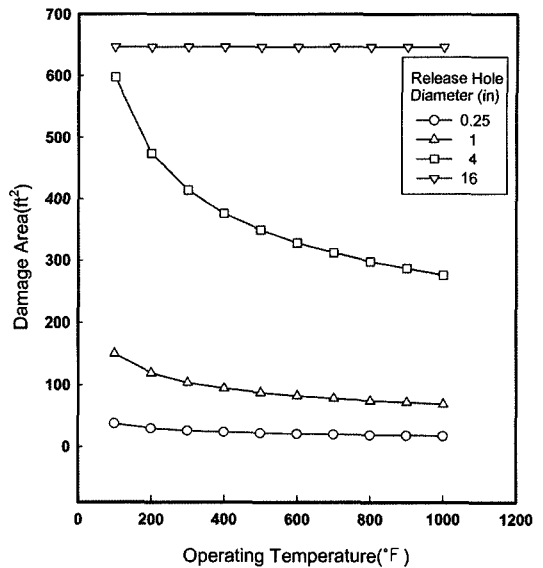
Fig. 4. Effect of the operating temperature, the release hole diameter, and the release source on the damage area at different operating pressures for LNG.

산출하였는데, 누출물질이 LNG인 경우에 산출한 장치 피해영역은 Fig. 4와 같이 누출속도가 클수록 피해영역이 크기 때문에 Fig. 2 및 Fig. 3의 누출속도에서와 비슷한 경향을 나타내었다. 즉, 장치피해영역은 공정온도가 증가할수록, 그리고 누출공이 작을수록 감소하

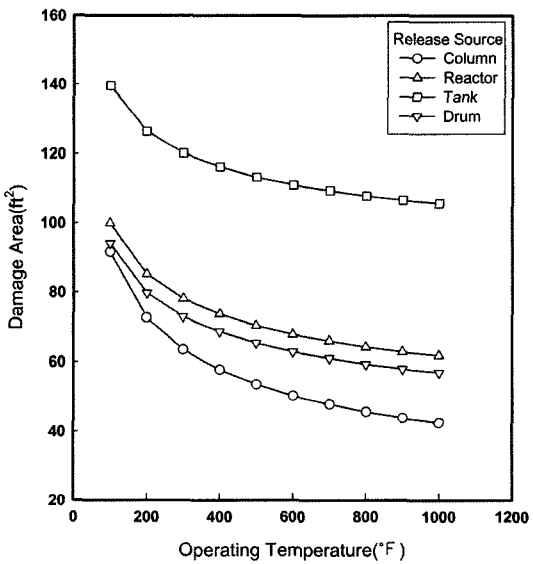
며, 또한 압력이 증가할수록 증가하였다. 또한 가중평균에 의한 장치피해영역도 탱크>반응기>드럼>탑의 순서로 나타났다. 그러나 누출공 직경이 16 inch인 경우에는 장치피해영역이 약 650 ft²의 일정한 값을 나타내었는데, 이것은 누출속도는 온도증가에 따라 감소하



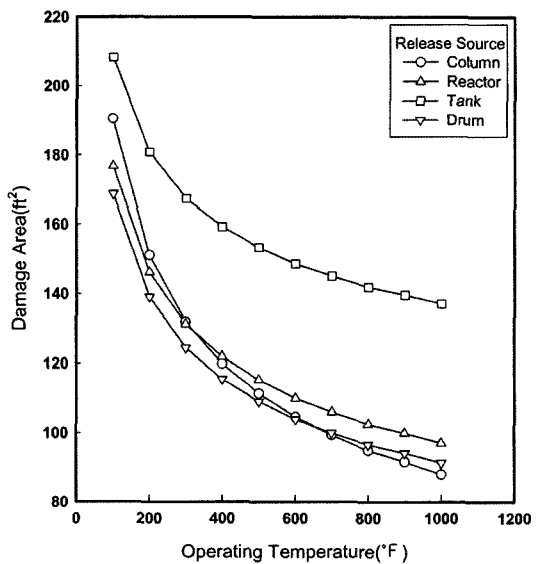
(a) Hole diameter (1 atm)



(b) Hole diameter (5 atm)



(c) Release source (1 atm)



(d) Release source (5 atm)

Fig. 5. Effect of the operating temperature, the release hole diameter, and the release source on the damage area at different operating pressures for LPG.

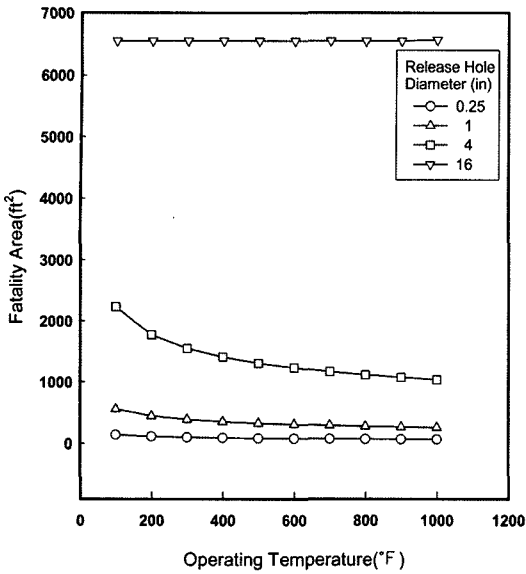
지만 누출속도와 누출시간에 의해 산출한 총 누출량이 10,000 lb_m 이상을 나타내어 순간누출로 가정하였기 때문이다.

Fig. 5는 누출물질이 LPG인 경우에 장치피해영역을 나타낸 것으로, LNG에서와 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 16 inch 직경의 누출공에서는 순간누출로 최대

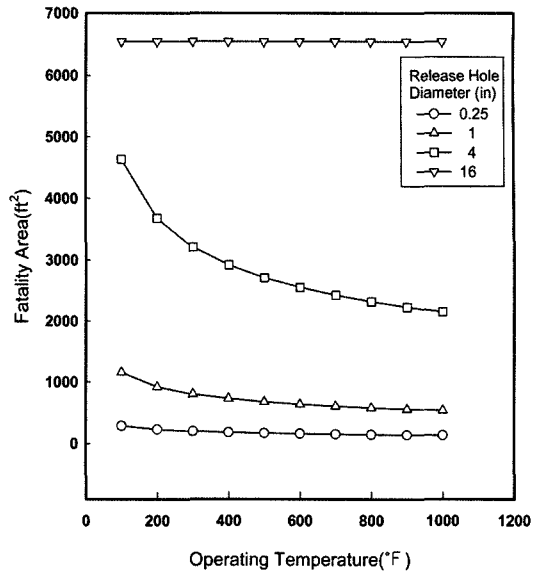
값을 나타내었고, 4 inch 이하의 누출공에서는 LNG에 비해 약 1.5배의 큰 값을 나타내었다.

3.3. 상해영역

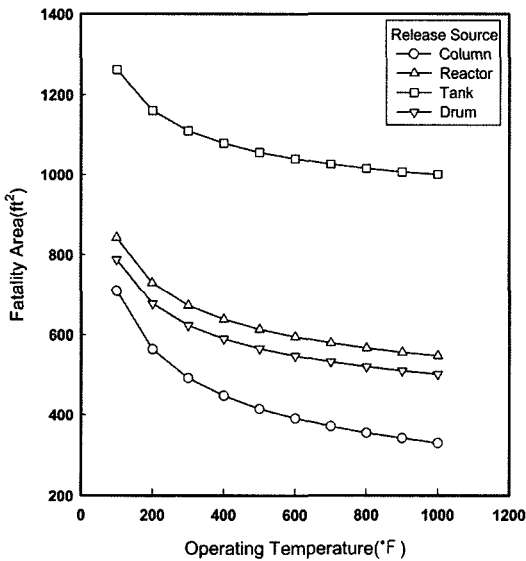
인적피해(사망)가 일어날 수 있는 상해영역은 폭발 과압이 1 psig인 경우를 기준으로 산출하였는데, 누



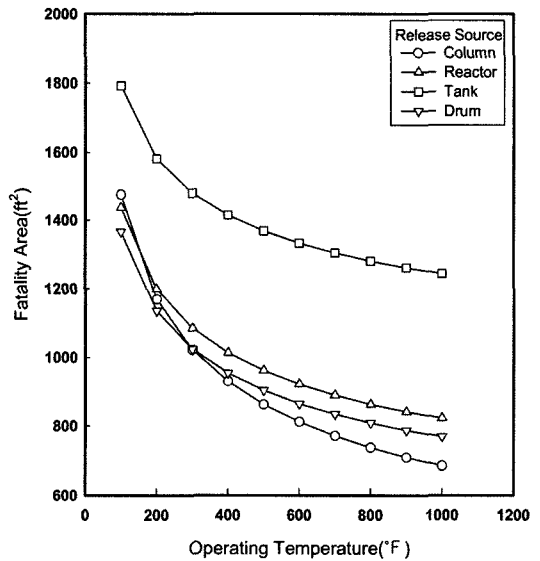
(a) Hole diameter (1 atm)



(b) Hole diameter (5 atm)



(c) Release source (1 atm)



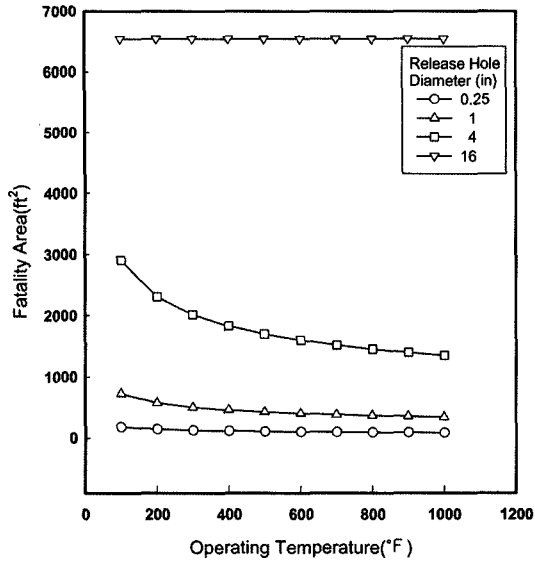
(d) Release source (5 atm)

Fig. 6. Effect of the operating temperature, the release hole diameter, and the release source on the fatality area at different operating pressures for LNG.

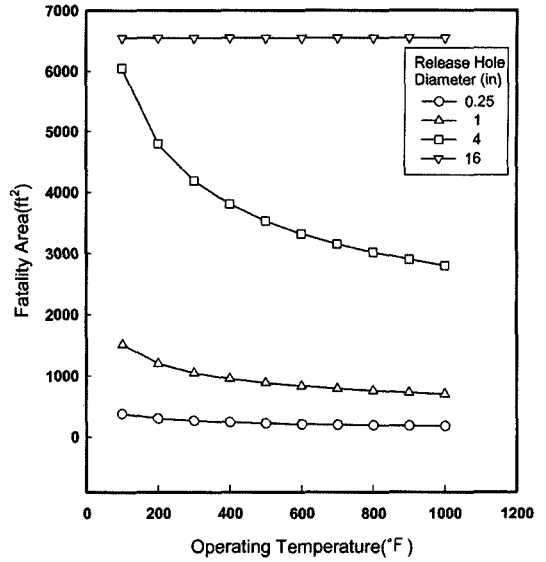
출공의 크기, 온도, 압력, 그리고 누출용기의 종류에 따른 상해영역은 누출물질이 LNG인 Fig. 6 및 누출물질이 LPG인 Fig. 7과 같으며, 장치피해영역과 유사한 경향을 가지며, 장치피해영역에 비해 약 8~10배의 큰 값을 나타내었다. 이때, LPG 누출에 의한 상해영역은 LNG 누출에서 보다 약 2.5배 정도 큰 값

을 나타내었다.

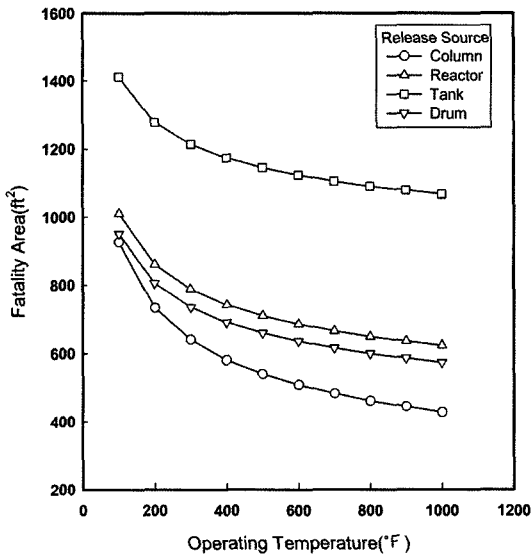
이상의 결과와 같이 API-581 절차에서 제시한 누출 시나리오를 사용하여 현실성 있는 사고영향 분석을 할 수 있었으며, 특히 배관누출의 결과[10]와 비교하면 용기누출의 누출속도와 피해범위가 배관누출의 경우보다 상당히 큰 값을 가짐을 알 수 있었다.



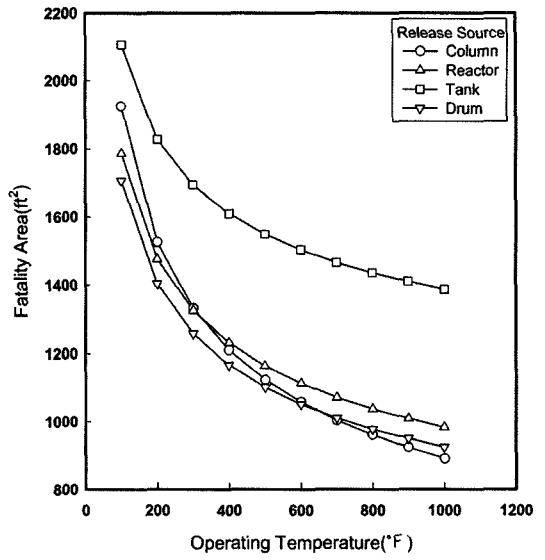
(a) Hole diameter (1 atm)



(b) Hole diameter (5 atm)



(c) Release source (1 atm)



(d) Release source (5 atm)

Fig. 7. Effect of the operating temperature, the release hole diameter, and the release source on the fatality area at different operating pressures for LPG.

IV. 결 론

이 연구에서는 용기누출로 인한 가스 폭발사고의 영향을 분석하는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 API-581 절차에서 제시한 누출 시나리오를 사용하여 누출물질, 온도, 압력 및 용기의 종류를 변화시키면서

누출속도, 장치피해영역 및 상해영역을 산출하였다. 그 결과, 용기누출에서 누출속도, 장치피해영역 및 상해영역은 배관누출에서보다 상당히 큰 값을 가지며, 그 크기는 탱크>반응기>드럼의 순서로 나타났다. 따라서 API-581 절차에서 제시한 누출 시나리오를 사용하여 현실성 있는 사고영향 분석을 할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Lees, F.P., *Loss Prevention in the Process Industries*, Butter-worths Ltd., Vol. 2, London, (1991)
- [2] Kletz, T.A., *What Went Wrong?*, Gulf Publishing Co., Houston, TX, (1986)
- [3] API, RBI Basic Resource Document : API-581, American Petroleum Institute, (2000)
- [4] Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), *Consequence Analysis(CA)*, Industrial Safety Training Institute of KOSHA, ISTI-2001-29-86, (2001)
- [5] CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, Center for Chemical Process Safety of AIChE, New York, (1989)
- [6] Crowl, D.A. and J.F. Louvar, *Chemical Process Safety Fundamentals with Applications*, Prentice Hall, New York, (1990)
- [7] Perry, R.H. and D. Green, *Perry's Chemical Engineering Handbook*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, (1997)
- [8] Crowley, W.K., *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*, Technical Manual TM 5-1300, U.S. Army, Navy, and Air Force, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C., (1969)
- [9] Industrial Risk Insurances(IRI), *Oil and Chemical Properties Loss Potential Estimation Guide*, IRInformation, IM 8011, (1992)
- [10] 이현창, 유준, 김태욱, “배관누출에 의한 가스 폭발 사고에서 누출 시나리오 선정 및 사고결과 분석”, *한국가스학회지*, **10**(4), 52-62, (2006)